

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205839

# 弱场自解耦极近距离 MIMO 天线设计\*

杜忠红 张晓晖 秦沛瑜 蒲玉蓉 席晓莉

(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

**摘要:**为了抑制极近距离多输入多输出(MIMO)天线单元间的强耦合,提出了一种将MIMO天线单元的馈电位置邻近排布在激励天线单元电磁场弱场区的解耦方法。其中电磁场弱场区域主要通过改变微带天线的馈电结构产生。为了满足项目特殊需求,首先,设计了一款边到边距离为1 mm( $0.011\lambda_0$ ,  $\lambda_0$ 为中心频率3.5 GHz时的自由空间波长)的二单元MIMO天线,仿真和实测结果表明,相比参考天线,利用该解耦方法使MIMO天线在工作频段内的隔离度最大改善了42 dB。进一步地,将改进天线单元沿 $120^\circ$ 分布构成一款三单元MIMO天线,该天线边到边最小距离仍然为1 mm。实验结果显示在工作频段3.45~3.55 GHz范围内,单元间的耦合抑制大于30 dB;在中心频率3.5 GHz处,测试的最大隔离度为52 dB,且各天线单元的反射系数不受影响。值得一提的是,所提出的解耦方法与传统方法相比,在减少互耦时不需要额外的解耦电路和结构,具有良好的应用前景。

**关键词:** MIMO 天线;高隔离度;零场区;弱场耦合抑制;自解耦

**中图分类号:** TN821<sup>+.3</sup> **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

## Design of self-decoupling very close-spaced MIMO antenna based on weak field

Du Zhonghong Zhang Xiaohui Qin Peiyu Pu Yurong Xi Xiaoli

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to suppress the strong coupling between extremely close-range multiple-input multiple-output (MIMO) antenna elements, a decoupling method is proposed to arrange MIMO antenna elements feeding position in an extreme adjacent distance where belongs to their weak electromagnetic field region. The weak electromagnetic field region is mainly generated by changing the feeding structure of the microstrip antenna. Firstly, a two-element MIMO antenna with an edge-to-edge distance of 1 mm ( $0.011\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  is the free-space wavelength at the center frequency of 3.5 GHz) is proposed. The simulation and measurement results show that the proposed decoupling method can improve the isolation of the MIMO antenna by 42 dB in the operating frequency band. The isolation performance of the proposed antenna is much more obvious than that of the reference antenna. Furthermore, a three-element MIMO antenna is constructed by arranging the improved antenna elements along  $120^\circ$ . The experimental results show that the coupling suppression is greater than 30 dB in the working frequency band of 3.45~3.55 GHz; the maximum isolation is 52 dB at the center frequency of 3.5 GHz. Moreover, the reflection coefficient of each antenna is not affected by the proposed decoupling structure. It is worth noting that the proposed decoupling method has a good application prospect as it does not need additional decoupling circuit and components compared to the traditional approach with respect to mutual coupling reduction.

**Keywords:** MIMO antenna; high isolation; null-field region; weak field coupling suppression; self-decoupling

## 0 引言

随着无线通信系统,特别是第五代(5G)移动通信的快速发展,多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术已被广泛应用于获取高数据传输速率和大信道容量<sup>[1-2]</sup>。然而,在 MIMO 系统中,由于 MIMO 天线单元之间距离较小而产生的强电磁耦合会使其性能明显恶化。所以寻找一种解决极近距离 MIMO 阵列天线耦合抑制的方法具有重要的意义<sup>[3-4]</sup>。近年来,已经报道了多种解耦方法,如缺陷地结构<sup>[5-9]</sup>,极化旋转结构<sup>[10-11]</sup>,超表面结构<sup>[12-14]</sup>,寄生谐振结构<sup>[15-17]</sup>,中和线<sup>[18-20]</sup>,自解耦<sup>[3-4,21]</sup>,电磁带隙结构<sup>[22]</sup>等。其中缺陷地结构通过延长地板上表面电流的路径或改善微波电路的传输特性来减少 MIMO 天线单元间的互耦。常见的缺陷地结构设计主要有:1)直接在 MIMO 天线的金属地板上刻蚀缝隙<sup>[5]</sup>;2)设计缺陷地结构滤波器,然后将其加载于天线阵列之间<sup>[6]</sup>。极化旋转结构是利用其极化旋转特性将耦合场中传输电磁波的电场方向扭转,减小天线单元接收来自其他天线单元辐射的电磁能量,从而实现 MIMO 天线单元间的耦合抑制。在文献[10]和[11]中,分别设计了置于天线单元顶层和底层的两种极化旋转结构,分别实现了 27 和 30 dB 的隔离增强。

超表面解耦是在距离阵列天线上方一定距离处覆盖超表面结构,使得  $\varepsilon_2\mu_2 = \varepsilon_1(\varepsilon_2, \mu_2$  分别为超表面结构的介电常数和磁导率,  $\varepsilon_1$  为天线介质基板的介电常数),此时 TE 和 TM 模式的截至频率都趋近于无穷大,说明此时表面波无法沿介质分界面传播。通过抑制表面波来减小天线单元间的互耦。Luan 等<sup>[12]</sup>提出了一种矩形缝隙超表面结构,通过调整其在 MIMO 天线上方的距离,有效减小了边到边距离为 2 mm ( $0.023\lambda_0$ ) MIMO 天线单元之间的互耦。

寄生谐振解耦的原理是受激励天线单元同时会对寄生谐振结构和非激励天线单元产生耦合,与此同时,寄生谐振结构也会对非激励天线单元产生耦合。假设非激励天线单元所受到的两种耦合电流等幅反向相互抵消,便可以降低天线单元间的耦合。文献[16]中,作者提出了一种由半波长微带线和短路针组成的解耦结构。由于该解耦结构引入了带有 270°相位转化的新耦合路径,有效抑制了原始天线单元间 90°相位变化。结果表明,当天线单元边到边距离为 2.6 mm ( $0.027\lambda_0$ )时,它们之间的隔离度从 7 dB 提升 18 dB。

在文献[3]中,华南理工大学潘咏梅研究团队提出了一种模式抵消的自解耦方法。该方法通过改变天线的馈电位置和尺寸,使其能够在耦合天线上同时激励起  $TM_{10}$  模和  $TM_{02}$  模。从而在耦合天线上产生特定的零场

区。当无源微带贴片天线的馈电位置位于该零场区时,微带贴片天线无法被有效激励,因此无需任何额外的解耦结构就可以使得天线单元间的耦合降低。结果表明,在 5.8 GHz 处,当 MIMO 天线 E 面和 H 面中心间距为  $0.41\lambda_0$  和  $0.5\lambda_0$  时,隔离度改善分别为 46 和 33 dB。同样地,在文献[21]中,作者采用相似的方法设计了一款具有高隔离度的高增益介质谐振器天线。自解耦技术采用天线单元的独特结构所表现出的不同特性来减少互耦,无需增加额外的解耦结构,因此具有奇妙的单元结构。自解耦方法虽然新颖有效,但缺乏系统的设计标准,需要不断优化天线单元结构和阵列布局。

综上所述,传统的解耦方法都需要基于额外的解耦结构,就会不可避免的增加整体天线阵列的复杂度,偶尔也会增加其高度以及整个天线阵列的尺寸,带来一些不必要的损耗,已有的一些自解耦方法都是基于耦合模式抵消,如何激发可以相互抵消的耦合模式是其面临的主要问题。在本文中,通过适当改变天线的馈电结构使该天线单元周围明显分布电磁场强场区和弱场区。然后,将两个天线单元电磁场最弱的区域邻近(1 mm)分布组成二单元 MIMO 天线。结果显示,该 MIMO 天线端口之间具有较高的隔离度( $S_{21} > 42$  dB)。相比参考天线,所提出的 MIMO 天线隔离度改善更加明显。进一步地,将 3 个天线单元电磁场最弱的区域间隔 120°分布,同样能实现 MIMO 天线端口之间的高隔离。采用本文提出的分布方法,不仅缩小了天线的单元间距,而且在组成多单元 MIMO 天线时可以使其整体的尺寸变得更小,且有利于更大阵列的设计。

## 1 基于弱场自解耦的 MIMO 天线设计

### 1.1 单元天线设计

图 1 展示了使用不同馈电技术的单元天线结构,所提出的天线印制在厚度为 3.175 mm,介电常数为 2.2 的 F4B 介质板上。将馈电结构设计成类似微带线馈电可以在天线周围有效形成电磁场强弱场区。微带线伸入贴片天线的长短会影响其输入阻抗。在图 1(a)中给出了传统的矩形贴片天线用于对比,两种单元天线基本尺寸,介质基板,中心频率以及辐射特性都基本相似。

图 2 为参考和改进天线单元的反射系数,可以看出,两款天线的中心频率都在 3.5 GHz,相比参考天线,改进天线单元的工作带宽减小约 45 MHz,但其辐射性能更好,这主要是由于矩形辐射贴片结构被破坏,所以无法保持与参考天线完全一致的工作带宽和辐射特性。

### 1.2 MIMO 天线自解耦机理分析

图 3 展示了参考天线单元和所提出天线单元在介质

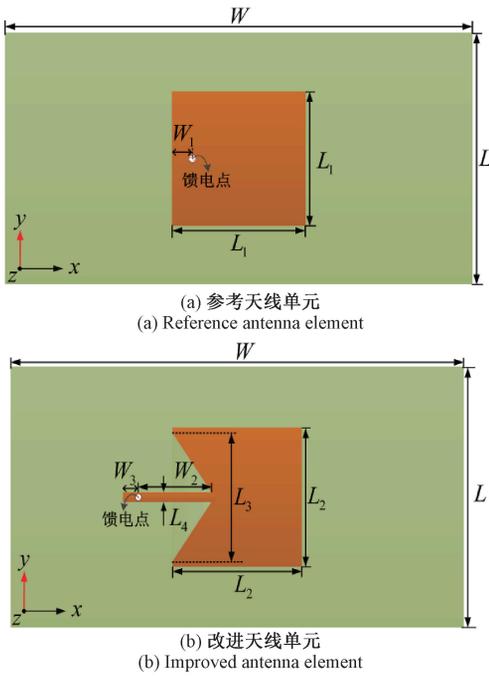


图 1 参考和改进天线单元的基本结构  
Fig. 1 Basic structure of reference and improvement antenna element

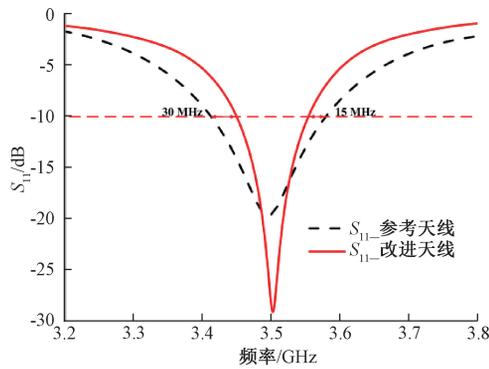


图 2 参考和改进天线单元的  $S_{11}$

Fig. 2 The  $S_{11}$  of reference and improvement antenna element

基板内的电场和地板表面电流分布。从图 3(a) 和 (c) 以及图 3(b) 和 (d) 分别可以看出,改进馈电结构的贴片天线周围形成了明显的电磁场弱场区,而参考天线的周围并未明显形成。这是因为由馈电结构和辐射贴片同时产生的场在某个特定的区域等幅反向,相互抵消。至此,可以推测若将两个或多个天线单元电磁场分布最弱的区域邻近分布在一起,天线单元之间的相互耦合会变的很小。

### 1.3 二单元 MIMO 天线设计与分析

为了验证之前的设想,提出了如图 4(a) 所示的二单元 MIMO 天线。该 MIMO 天线是将两个改进馈电结构的贴片单元电磁场最弱的区域邻近分布,单元间距仅为 1 mm。天线的初始分布结构为图 4(a) 中虚线所示,考虑

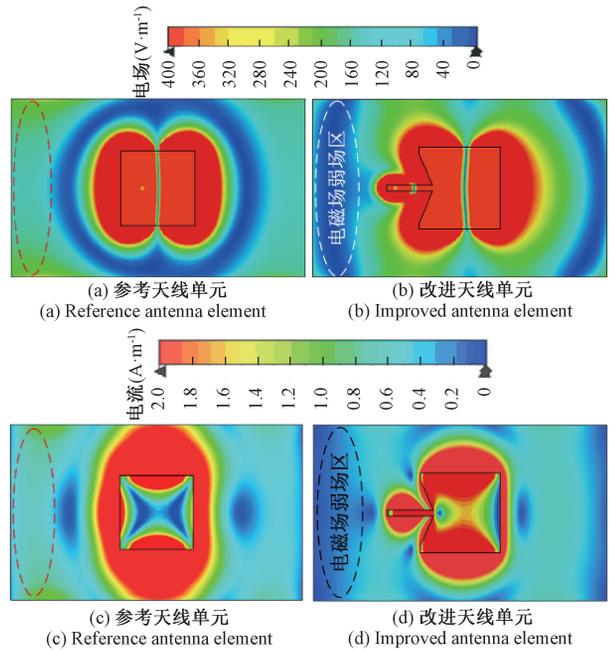
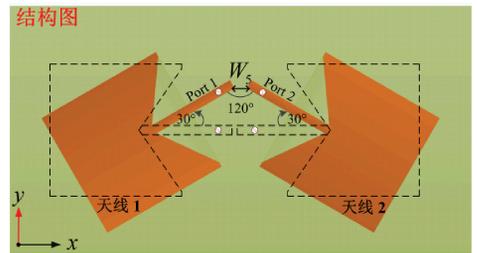


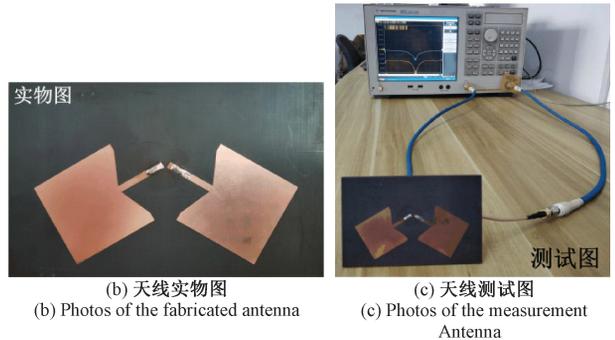
图 3 参考和改进天线单元介质基板内的电场分布和地板上的表面电流

Fig. 3 Reference and the improved the electric field and surface current distribution of the antenna element

到项目本身的特殊需求,为了能更方便实现多单元 MMO 阵列,将两个单元各自旋转 30° 分布。



(a) 二单元 MIMO 天线结构  
(a) Improved two-element MIMO antenna structure



(b) 天线实物图  
(b) Photos of the fabricated antenna  
(c) 天线测试图  
(c) Photos of the measurement Antenna

图 4 改进二单元 MIMO 天线结构和测试  
Fig. 4 Improved two-element MIMO antenna structure and measured

图 5 为二单元 MIMO 天线的 S 参数,可以看出,在工作带宽 3.45~3.55 GHz 范围内,MIMO 天线的隔离度均

大于 30 dB;在中心频率 3.5 GHz 处达到了最大值 42 dB,实测隔离度的值约为 50 dB。相比未改进的 MIMO 天线,隔离度最大提升了约 40 dB。实测和仿真的结果可以得出,相比未改进的 MIMO 天线,该自解耦方法能有效抑制单元天线间的相互耦合。

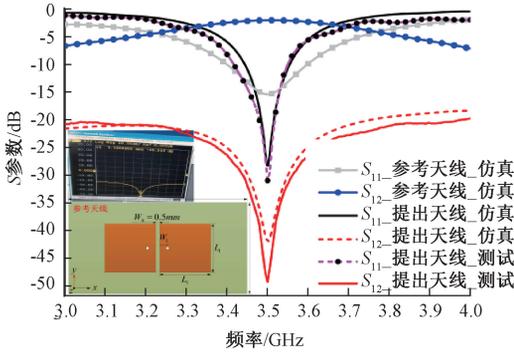


图 5 参考和改进的二单元 MIMO 天线的 S 参数

Fig. 5 S-parameters of reference and improved two-element MIMO antennas

从图 6(a)和(b)所展示的 MIMO 天线在 3.5 GHz 处的表面电流可以看出,当天线 1 激励,天线 2 接 50 Ω 负载时,对于参考 MIMO 天线,天线 2 上耦合了大量的电流;而对于改进的 MIMO 天线,由于两个弱场的叠加,天线 2 上的耦合电流强度非常弱。同样地,介质基板中电场和磁场也具有相同的分布情况。

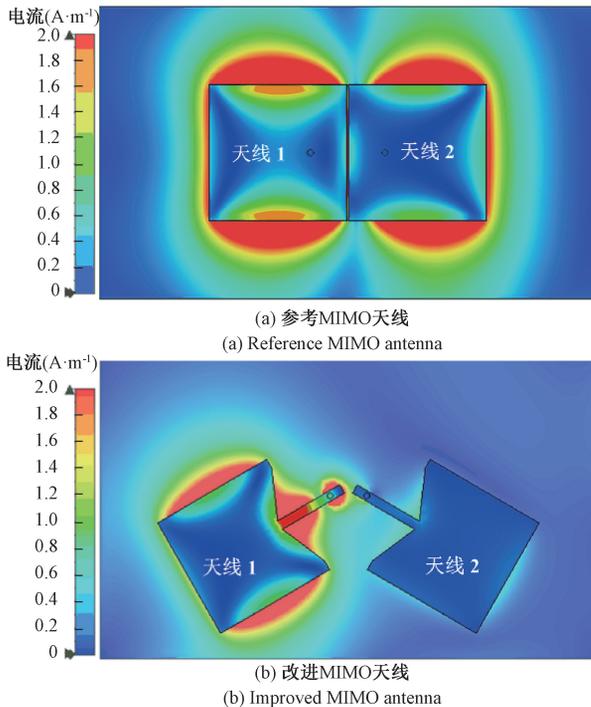


图 6 参考和改进二单元 MIMO 天线在 3.5 GHz 时的表面电流分布

Fig. 6 Surface current distribution of reference and improved two-element MIMO antenna at 3.5 GHz

图 7 为参考与改进二单元 MIMO 天线在 3.5 GHz 时天线 1 的方向图。可以看出,改进的 MIMO 天线不仅修正了主辐射方向( $\theta = 0^\circ$ ),而且减小了天线的后向辐射。参考天线的前后比为 8.68 dB,而改进天线的前后比为 19 dB。进一步地,如图 8 所示,天线的增益也提高了 2.8 dBi。

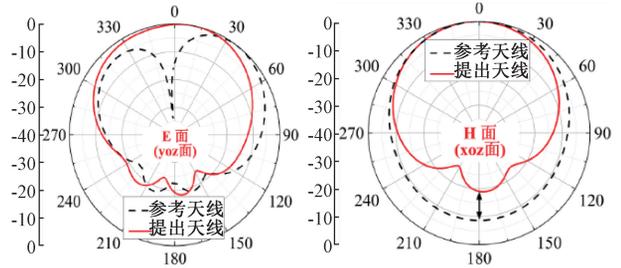


图 7 二单元 MIMO 天线在 3.5 GHz 处的辐射方向图

Fig. 7 Radiation pattern of two-element MIMO antenna at 3.5 GHz

图 8 为参考和提出的 MIMO 的天线增益和辐射效率,可以看出,由于金属和介质的损耗较低,天线的辐射效率大于 96%,仿真的总效率在整个工作带宽内为 87%~96%。此外,提出的 MIMO 天线在工作带宽内的实际增益为 6.78~7.16 dBi,相比参考 MIMO 天线,至少改善了 2.5 dBi。

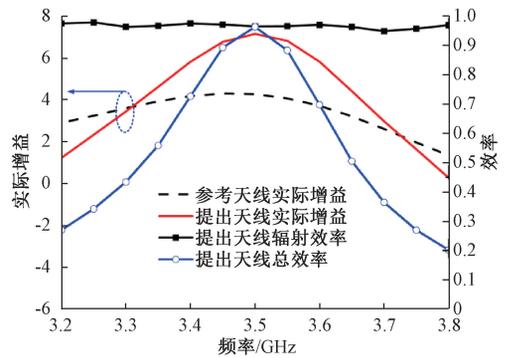


图 8 二单元 MIMO 天线的增益和辐射效率

Fig. 8 Gain and radiation efficiency of two-element MIMO antenna

为了评估所提出的近距离自解耦 MIMO 天线系统发散集性能,图 9 展示了仿真的互相关系数,可以看出,改进的 MIMO 天线的包络关系数 (envelope correlation coefficient, ECC) 非常小,接近于 0,相比参考天线 (小于 0.57) 改善巨大。互相关系数由 S 参数计算,即

$$\rho_{ej} = ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (1)$$

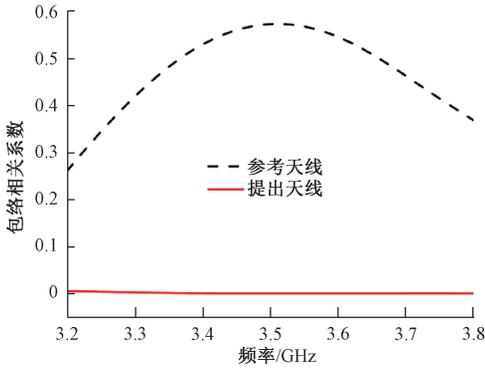


图 9 二单元 MIMO 天线的包络相关系数

Fig.9 ECC of two-element MIMO antenna

### 1.4 三单元 MIMO 天线设计与分析

常见 MIMO 天线的排列方式为沿着  $x$  轴或  $y$  轴方向。本设计若依旧采用这种排列方式,则是将一个天线单元的弱电磁场区域场置于另一天线单元的强电磁场区域这,这样不仅增大了单元间距,而且隔离度改善不明显。在本文中,将改进的单元天线沿  $120^\circ$  排布组成三单元 MIMO 天线,这种情况下,可以有效地将其电磁场弱场区域相互靠近,以此减小单元天线之间的相互耦合。此外,为了保证天线 3 的阻抗匹配,将其周围地板的长宽调整至与单天线相近,最后提出了如图 10(a)所示的三单元 MIMO 天线结构。

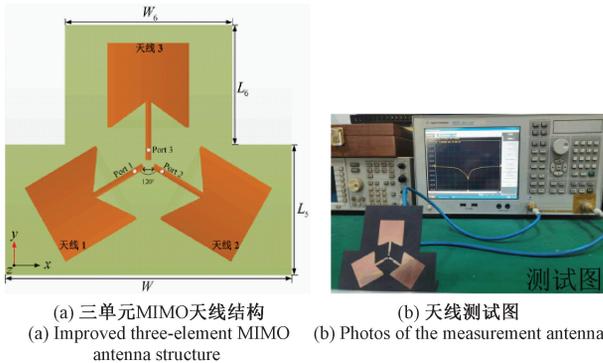
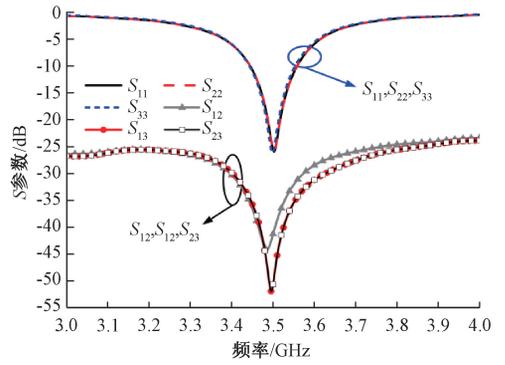


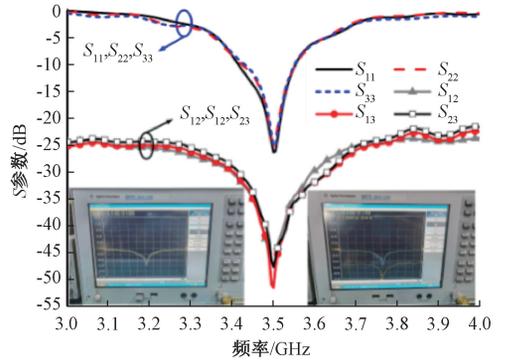
图 10 三单元 MIMO 天线结构和测试

Fig.10 Three-element MIMO antenna structure and measured

图 11 为当端口 1 激励,其他两个端口接  $50 \Omega$  匹配负载时 MIMO 天线的  $S$  参数仿真和实测结果,可以看出天线的反射系数基本相同,说明阵列天线单元间的耦合对其影响较小。在工作频段内,MIMO 天线相邻端口间的隔离度均大于  $30 \text{ dB}$ ,在中心频率  $3.5 \text{ GHz}$  处  $S_{12}$  和  $S_{13}$  分别为  $42$  和  $52 \text{ dB}$ 。相比未改进的 MIMO 天线,反射系数和隔离度均有明显的改善。天线测试和仿真的结果吻合很好,进一步验证了本文改进的自解耦方法的正确性和优点。



(a) 仿真 S 参数  
(a) Simulated S-parameters



(b) 实测 S 参数  
(b) Measured S-parameters

图 11 三单元 MIMO 天线仿真和实测 S 参数

Fig.11 Three-element MIMO antenna simulated and measured S-parameters

同样地,为了更加直观地验证所提出方法的解耦能力,仿真了工作在  $3.5 \text{ GHz}$  谐振频率时的三端口 MIMO 天线的表面电流分布。如图 12 所示,当天线 1 被激励时,天线 2 和 3 辐射贴片和地板上的电流都非常微弱。这表明采用该解耦方法可以有效地抑制天线 1 激励下的耦合,可以推广至更多单元的 MIMO 天线。

采用电磁仿真软件 CST 2021 对天线的各项性能参数仿真计算,使用安捷伦 E5071C 矢量网络分析仪测试了天线的  $S$  参数。最终,天线的详细尺寸如表 1 所示。

表 1 所提出天线的详细尺寸

Table 1 Detailed dimensions of the proposed antenna

(mm)							
参数	$W$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$
数值	100	8.0	15.57	3	0.5	1.0	68
参数	$L$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
数值	60	26	28	23	2.0	44	52

## 2 结果比较

表 2 展示了本文所提出的天线和参考文献中相关

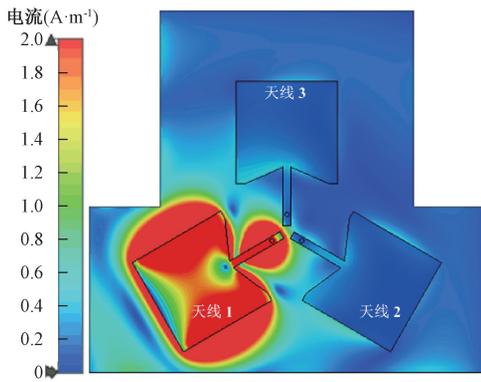


图 12 三单元 MIMO 天线在 3.5 GHz 时的表面电流分布  
Fig. 12 Surface current distribution of three-element MIMO antenna at 3.5 GHz

表 2 本文所提出 MIMO 天线与之前报道的相关 MIMO 天线的性能比较

Table 2 Performance comparison with other MIMO antenna

文献	解耦方法	谐振频率/GHz	边到边距离	增益	最大隔离增强	设计复杂度
[3]	自解耦	5.8	7.52 mm ( $0.15\lambda_0$ )	5.32 dBi	46 dB	高
[6]	缺陷地	2.3	20 mm ( $0.17\lambda_0$ )	5 dBi	35 dB	高
[10]	极化旋转隔离器	5.8	9 mm ( $0.174\lambda_0$ )	$\approx 5$ dBi	22.3 dB	高
[12]	缝隙超表面	3.5	2 mm ( $0.023\lambda_0$ )	6.48 dBi	41 dB	高
[16]	寄生谐振解耦	3.16	2.6 mm ( $0.027\lambda_0$ )	5.5 dBi	11 dB	低
[21]	自解耦	5.25	16.9 mm ( $0.327\lambda_0$ )	7.8 dBi	45 dB	高
本文	自解耦	3.5	1 mm ( $0.011\lambda_0$ )	7.1 dBi	48 dB	低

注:本文与文献中的天线均以二单元天线为例对比

### 3 结论

本文改进设计了一款利用弱场耦合的自解耦 MIMO 天线。通过改进其单元天线的分布方式,使得单元天线的电磁场弱场区相互靠近,当非激励天线单元的馈电位置正好处于该弱场区时,MIMO 天线单元间的相互耦合明显降低。结果表明单元天线间距为 1 mm ( $0.011\lambda_0$ ) 时,隔离度改善在 27~40 dB 之间,包络相关系数改善也非常明显。进一步地,设计了三单元 MIMO 天线,该天线在中心频率 3.5 GHz 的隔离度为 52 dB,交叉极化,增益等各项性能良好,为 MIMO 天线耦合抑制方面的研究提供了一些新思路。

### 参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [2] 高明明,王纪禹,南敬昌,等. 一种紧凑型三陷波 UWB-MIMO 天线的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 144-151.  
GAO M M, WANG J Y, NAN J CH, et al. Design of a compact triple-notch UWB-MIMO antenna[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,

天线的性能对比。可以看出,所提出 MIMO 天线边到边的距离均小于参考文献,仅为 1 mm;其次,相比文献[3]和[21],尽管都采用了自解耦的去耦方法,但本文所提出的弱场耦合的方法其设计复杂度远小于文献[3]和[21]。需要注意的是,文献[21]所提出的 MIMO 天线的增益较大,主要是由于所采用的单元天线为介质谐振天线。进一步地,可以发现在中心频率处实际测量的最大隔离度改善相比相关参考文献也具有明显优势,最大改善约为 48 dB。最后,相比各类传统解耦方法,基于弱场的自解耦方法理论简单,可实现性更强,在后期的设计中在保证单元天线基本性能的前提下,只需要设计出场分布在不同区域具有强弱特点的单元天线即可。

36(4): 144-151.

- [3] LAI Q X, PAN Y M, ZHENG S Y, et al. Mutual coupling reduction in MIMO microstrip patch array using  $TM_{10}$  and  $TM_{02}$  modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7562-7571.
- [4] SUN L B, LI Y, ZHANG Z J, et al. Self-decoupled MIMO antenna pair with shared radiator for 5G smartphones [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 3423-3432.
- [5] 王丽黎,杜忠红,杨海龙,等. 具有高隔离度的双陷波超宽带多入多出天线[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(6): 85-91.  
WANG L L, DU ZH H, YANG H L, et al. Dual band-notch ultra-wideband multiple-input multiple-output antenna with high isolation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(6): 85-91.
- [6] WEI K, LI J Y, W L, et al. Mutual coupling reduction by novel fractal defected ground structure bandgap filter [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(10): 4328-4335.
- [7] GAO D, CAO Z X, FU S D, et al. A novel slot-array defected ground structure for decoupling microstrip antenna array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(10): 7027-7038.

- [ 8 ] 南敬昌, 韩欣欣, 高明明, 等. 基于 DGS 的小型化 UWB-MIMO 天线的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 89-95.  
NAN J CH, HAN X X, GAO M M, et al. Design of miniaturized UWB-MIMO antenna based on DGS [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 89-95.
- [ 9 ] WANG L L, DU Z H, YANG H L, et al. Compact UWB MIMO antenna with high isolation using fence-type decoupling structure [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(8): 1641-1645.
- [ 10 ] CHENG Y F, DING X, SHAO W, et al. Reduction of mutual coupling between patch antennas using a polarization-conversion isolator [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1257-1260.
- [ 11 ] WEI K, LI J Y, WANG L, et al. Microstrip antenna array mutual coupling suppression using coupled polarisation transformer [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(13), 1836-1840.
- [ 12 ] LUAN H Z, CHEN C, CHEN W D, et al. Mutual coupling reduction of closely E/H-plane coupled antennas through metasurfaces [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(10): 1996-2000.
- [ 13 ] WANG Z Y, LI C L, WU Q, et al. A metasurface-based low-profile array decoupling technology to enhance isolation in MIMO antenna systems [J]. IEEE Access, 2020, 8: 125565-125575.
- [ 14 ] DU Z H, ZHANG X H, QIN P Y, et al. A slot metasurface for the MIMO antenna isolation enhancement [C]. 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2021, Zhuhai, China, 2021.
- [ 15 ] GHANNAD A A, KHALILY M, XIAO P, et al. Enhanced matching and vialess decoupling of nearby patch antennas for MIMO system [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(6): 1066-1070.
- [ 16 ] PEI T Q, ZHU L, WANG J P, et al. A low-profile decoupling structure for mutual coupling suppression in MIMO patch antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(10): 6145-6153.
- [ 17 ] ABBASI M N, AZIZ A, MALIK W A, et al. A simple and modular MIMO antenna system for closely spaced patch antennas [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 1-7.
- [ 18 ] ZHANG S, PEDERSEN G F. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15(1): 166-169.
- [ 19 ] LI M, JIANG L J, YEUNG K L. A general and systematic method to design neutralization lines for isolation enhancement in MIMO antenna arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(6): 6242-6253.
- [ 20 ] LIU R P, AN X, ZHENG H X, et al. Neutralization line decoupling tri-band multiple-input multiple-output antenna design [J]. IEEE Access, 2020, 8: 27018-27026.
- [ 21 ] PAN Y M, HU Y, ZHENG S Y. Design of low mutual coupling dielectric resonator antennas without using extra decoupling element [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7377-7385.
- [ 22 ] 高明明, 宋杨, 南敬昌, 等. 紧凑型超宽带 MIMO 天线的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 149-156.  
GAO M M, SONG Y, NAN J CH, et al. Research of a compact UWB-MIMO antenna with X band-rejected [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 149-156.

## 作者简介



杜忠红, 2020 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学电磁场与微波技术专业博士研究生, 主要研究方向为近距离大规模 MIMO 天线解耦技术、电磁超表面和射频电路等。

E-mail: duzhonghong00@163.com

**Du Zhonghong** received his M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate in electromagnetic field and microwave technology, Xi'an University of Technology. His main research interests include massive MIMO antennas decoupling technology, electromagnetic metasurface and RF circuits.



张晓晖 (通信作者), 分别在 1995 年、2002 年和 2009 年于西安理工大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西安理工大学教授, 主要研究方向为先进导航、信号处理和电波传播与天线设计等。

E-mail: xhzhang@xaut.edu.cn

**Zhang Xiaohui** (Corresponding author) received his B. Sc, M. Sc. and Ph. D. degree from Xi'an University of Technology, Xi'an, China in 1995, 2002 and 2009. Now he is a professor in Xi'an University of Technology. His main research interests include advanced navigation, signal processing and radio wave propagation and antenna design.